

2018年秋季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告

一北極海の海水減少の中緯度気候への影響は本当か？一

西井和晃^{*1}・中村哲^{*2}・森正人^{*3}

1. はじめに

2000年代以降、急激な北極海の海水減少が観測されている。この海水減少が北極域のみならず、日本を含む中緯度の気候にも影響を与える可能性が指摘されている。海水減少と時を同じくして観測されている冬季のユーラシア大陸の気温低下傾向も、この海水減少が原因であるとする主張が、経年変動に見られる統計的關係や大気大循環モデルを用いた実験に基づきなされている。しかし、ユーラシア大陸の気温低下傾向は大気の内部変動（つまり偶然）によるものであり海水減少は原因ではない、という主張も最近されるようになってきた。後者の主張は、少なくとも彼らのモデル実験では、海水減少への気温応答がユーラシア大陸上で得られないことに基づく。今回の研究会は、2018年10月29日（秋季大会第1日）に仙台国際センターの中会議室にて、海水変動の中緯度気候への影響に関する研究に取り組んでいるお二方にご講演を頂いた。約30名の参加者の活発な質疑、意見交換が行われた。以下に講演内容の抄録を記す。

担当世話人：西井和晃（三重大学大学院生物資源学研究科）

http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index

2. 海水—北極振動連関における成層圏過程・陸面過程・不確実性

中村 哲（北海道大学）

北極海の海水減少に対する大気応答を評価したシミュレーション研究では、北極の温暖化および中緯度、特にシベリア—東アジアでの低温化傾向（Warm Arctic Cold Siberia/Eurasia, WACS/WACE）が応答として得られている。しかしながらそのような応答シグナルは、大気の内部変動に対する S/N 比が小さく、ロバストなシグナルを得るためには100程度以上のサンプル数がなければならない（Mori *et al.* 2014）。一方で観測（再解析データ）に基づく研究では、20ほどのサンプル数で海水減少と大気場の変化に相当に有意な関係があることが示される（Nakamura *et al.* 2015）。このようなシミュレーションと観測とのギャップは、ここ数十年で観測された海水減少と WACE シグナルとの関係は必ずしも海水減少からの一方的な強制によるものではなく、相互に影響し合うフィードバックプロセスが働いているとの示唆を与える。本講演では筆者のこれまでの研究結果を踏まえて、北極温暖化に関わる様々な物理プロセスがどのようなフィードバック構造を持っているかを考察し、近年の北極温暖化/中緯度寒冷化の理解を深めるための指針とすることを目標とした。

海水減少と関係する北極温暖化/中緯度寒冷化のシグナルにはいくつかの解釈が提示されているが、我々はこれを北極振動（Arctic Oscillation, AO）/北大西洋振動（North Atlantic Oscillation, NAO）の負位相の発現として捉える。北極振動は力学的な特徴として子午面上での大規模な二次循環を伴う。負位相の場合、この循環は中緯度の温暖な空気塊を北極へ、北極の寒冷な空気塊を中緯度へ押し出す働きを持つ。北極海の海水減少は北極域での海から大気への熱供給を増

^{*1}（連絡責任著者）Kazuaki NISHII, 三重大学大学院生物資源学研究科, nishii@bio.mie-u.ac.jp

^{*2} Tetsu NAKAMURA, 北海道大学大学院地球環境科学研究院.

^{*3} Masato MORI, 東京大学先端科学技術研究センター.

やす直接的な効果を持つが、それによって変調される大気循環はさらに北極域を温める正のフィードバック構造を持つ(第1図)。AR4/CMIP3等で示される将来予測では極向きエネルギー輸送増加は潜熱輸送が主として寄与しており(Hwang *et al.* 2011)、現在気候で見られる二次循環の働きとは逆センスである。これは現在気候と将来気候で北極温暖化に対する支配プロセスが異なる可能性を示唆する。

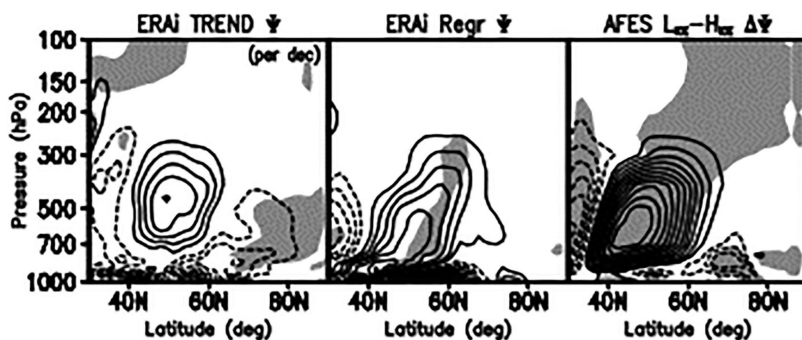
現在気候における北極温暖化に関連した顕著な特徴として、成層圏との結合の強まりが示唆される(Jaiser *et al.* 2016)。海水減少に対する定常応答はユーラシア大陸上の気候学的惑星波を強めることで成層圏およびそれに付随して対流圏の極渦を弱める。極渦の弱まりは北極振動の負位相に対応する。我々を含むいくつかのグループでは数値モデルの成層圏変動を人為的にダンピングする実験により、海水減少に対する対流圏の応答が大きく変わることを示し(Nakamura *et al.* 2016; Wu and Smith 2016)、成層圏過程の重要性が示された。数値モデルの成層圏の表現が成層圏のみならず対流圏の極渦変動(=北極振動、もしくは環状モード)の振幅や持続性を強く制約することはよく知られており(Gerber *et al.* 2014; Cagnazzo and Manzini 2009)、成層圏過程の表現の良し悪しが北極温暖化のシミュレーション不確実性の要因の一つであると考えられる。成層圏の極渦変動自体は対流圏からの惑星波伝搬によって生じることはよく知られている一方、準二年振動のような力学的、または成層圏オゾンの太陽放射加熱のような物理的要因による変調が

どの程度影響するか明らかではない。例えば、CMIP3で使用された数値モデルの大多数はこれらの表現を不得意としており、さらなる検証が必要である。

大気海洋結合は海水変動そのものに関わる結合過程であり、どのようなフィードバック構造があるか考察したい。北大西洋域ではNAOが正位相となるとき、それに伴う海流変化により北極海への暖水流入が強化される(Blindheim *et al.* 2000)。暖水流入は北極海の海水を減少させる。海水減少に対する大気場の応答が負のNAOとなることを考えればこの機構は負のフィードバック構造を持つ。一方で、大気海洋結合モデルを用いた北極温暖化のシミュレーションでは、大気海洋結合を切った場合よりも、海洋熱力学とフル結合させた場合に北極海水減少に対する大気応答が約50%増加する、つまり正のフィードバック構造が報告されている(Deser *et al.* 2016)。海洋の役割については、まだ不明な点が多いが、どのような力学・時間スケールでどのようなフィードバック構造が働くのか明らかにしていく必要がある。

北極温暖化・中緯度寒冷化に関連した陸面過程の役割についても考察する。夏季の海水減少に伴い北極海からの水蒸気供給が増加すると秋季のユーラシア大陸での降雪量が増加する(Wegmann *et al.* 2015)。積雪増加に伴う大陸の冷却は冬季の気候学的な海陸熱コントラストを強化し、惑星波変調により成層圏-対流圏の極渦を弱め、WACE的なシグナルを強める傾向があると考えられる(Cohen *et al.* 2014)。このような季節間スケールに加えて、より長い経年スケールで

の陸面過程のメモリ効果が北極温暖化に寄与しているか検証した。気候モデルを用いた海水実験において初期化条件を工夫することで、負の北極振動的なパターンを示す応答を、海水減少に対する直接応答と陸面に記憶されるメモリ効果とに切り分けた(第2図)。その結果、直接応答とメモリ効果はほぼ対等に寄与しており、メモリ効果はモデルでシミュレートされる北極温暖化の振幅を20%増加させることが分かった。こ



第1図 冬季(12-1-2月平均)のMIM系質量流線関数偏差。(左)再解析データ1979-2011期間の線形トレンド。(中)先行する11月の海水面積指数へ射影した回帰係数。海水面積が減少した時に正偏差となるよう符号を逆転している。(右)大気大循環モデルの少氷実験と多氷実験の偏差。実線(破線)は正(負)の偏差を示し、等値線間隔は 10^9 kg/s、陰影は95%信頼水準を示す。

のようなメモリ効果の挙動はモデル間不確実性が大きく、その検証もなされていないことから、今後のモデル間比較実験等でも考慮していくべきであろう。

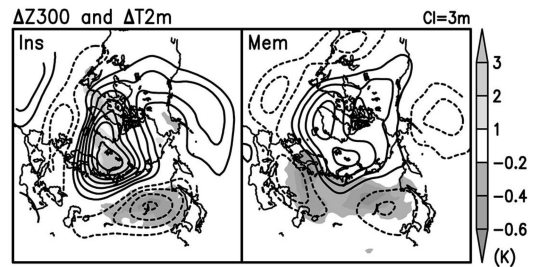
本講演では現在気候における北極温暖化と中緯度寒冷化傾向に関して、シミュレーション不確実性に関するいくつかの物理プロセスとそれらとの間にあるフィードバック構造について考察した。北極域は観測困難域であり、衛星観測の発達した現在でも観測が十分とは言い難い。そのため数値モデルによるシミュレーション実験が不可欠である。現在予定されている国際的マルチモデル比較実験 (InterDec や PAMIP) を通したシミュレーションの高精度化に加えて、シミュレーション結果やモデル特性の検証の為に適切な観測データを得る必要があり、今後ますます学際的な動きが期待される。

3. 北極海水変動に対する大気応答の同定と定量化

森 正人 (東京大学先端科学技術研究センター)

海水面積の急速な縮小を伴う北極域の加速度的な温暖化とは対照的に、冬季ユーラシア大陸の中央部から東アジアの中緯度域では近年、異常寒波 (Horton *et al.* 2015; Johnson *et al.* 2018) や厳冬 (Mori *et al.* 2014) が頻発し、北極域とは逆に寒冷化が進んでいる (Cohen *et al.* 2014)。北極のバレンツ・カラ海で海水が減少する時にユーラシア中緯度域で気温が下がるという相関関係が観測データから確認されるため、地球温暖化による海水域の縮小が異常寒波や厳冬の一因であることが示唆されていた (e.g. Inoue *et al.* 2012)。

しかしこの相関関係は必ずしも因果関係を説明しないため、上記仮説の検証のために AGCM を用いた大規模アンサンブル実験が数多く実施されてきた。多くの研究は上記仮説を支持する結果を得た一方 (e.g. Honda *et al.* 2009; Mori *et al.* 2014; Nakamura *et al.* 2015)、有意な関係を検出できなかった複数の研究は、近年の寒冷化は海水減少による大気応答 (すなわち地球温暖化の影響) ではなく、大気の内変動によるもの (たまたま厳冬が続いているだけ) と結論付けている (e.g. Sun *et al.* 2016; McCusker *et al.* 2016; Ogawa *et al.* 2018)。このように検証結果が研究間で定性的に異なり、ユーラシアの寒冷化に対する海水減少の影響の有無は世界的な論争になっている (e.g. Screen 2017; Screen *et al.* 2018; Shepherd 2016)。そこで本研究では、研究間で海水減少の影響の評価に違いが生じる原因を調査し、それを踏まえた



第2図 冬季 (12-1-2月平均) の海水減少に対する直接応答 (Ins, 左) およびメモリ効果による偏差 (Mem, 右). 実線 (破線) は正 (負) の300hPa 高度場偏差を示し、等値線間隔は 3m である。陰影は地上 2m 気温偏差を示す。

上で寒冷化に果たす海水減少の影響の定量化を試みた (Mori *et al.* 2019)。

MIROC4 AGCM による AMIP 実験 (1979-2014 年, 40メンバー) に加え、諸外国の研究機関で開発された 6 つの AGCM による AMIP 実験を用い、計219メンバーもの大規模な長期アンサンブル実験を解析した。冬季 (12-2月) に観測された地表気温の年平偏差と、モデルで得られた地表気温偏差のアンサンブル平均との間で特異値分解解析を行い、両変動に共通する成分として、外部変動のうち主要な変動成分 (外部変動モード) の抽出に成功した。

このモードは観測とモデルの両方で、WACE パターン (Mori *et al.* 2014) を示す。WACE パターンの強さの年々変動はバレンツ・カラ海の海水密度偏差と高い相関を示すことから、バレンツ・カラ海の海水変動がこのモードの強制源だと解釈される。この結論は MIROC4 AGCM による感度実験からも支持される。AGCM は観測された WACE パターンをよく再現するものの、その振幅が特に中緯度域で観測よりも弱く、解析した全ての AGCM が海水変動によって駆動される WACE の分散を実際よりも過小評価していることが明らかになった。またその程度がモデル間で異なることも分かった。この結果は AGCM では海水変動に対する大気の S/N 比が観測に比べて著しく小さいことを意味しており、このことが研究間で海水減少の影響の評価が異なる潜在的な要因と考えられる。即ち、実験設定や解析手法、アンサンブルサイズを注意深く選ばない限り、海水減少によるモデルの WACE 応答が他の影響によって容易に覆い隠されてしまうからである。

最近20年間に観測されたトレンドは、シベリア高気圧の強化とユーラシア大陸の中央部での寒冷化を示し、寒冷化の約44% (95%の信頼度で32~51%) が、バレンツ・カラ海の海水減少によって励起されたWACEパターンによって説明されることが明らかになった。

一方でAGCMのアンサンブル平均場は、シベリア高気圧の強化も寒冷化のシグナルも再現せず、海水の影響に否定的な先行研究 (Sun *et al.* 2016 ; Ogawa *et al.* 2018) の結果と非常によく一致し、上述の観測データを元にした評価 (寒冷化の44%が海水起源) と明らかに矛盾する。そこで上述のモデルバイアスを補正した上でトレンドを求め直したところ、観測されたトレンドと良く似た応答が検出された。この結果は、AGCMが海水変動の影響を過少評価していることが、観測とモデル間で異なる評価を生む原因になっていることを意味する。

これらの結果は地球温暖化が海水減少を介して当該地域での寒波・寒冬の発生確率を高めていること、そしてその影響が既に顕在化していることを意味する。地球温暖化が進行する中で生じる過渡現象だと考えられるが、今後の推移を精度良く予測するために、モデルバイアスの原因を特定・改善する必要がある。複数のAGCMを同一の実験設定で駆動し、海水変動の影響の違いを調べる国際的な相互比較プログラム (InterDec, PAMIP) が進行中で、そのような取り組みを通じて原因が明らかになる可能性があり、今後の研究成果が期待される。

謝 辞

極域・寒冷域研究連絡会は、講演を快く引き受けていただいた中村 哲氏と森 正人氏とに感謝申し上げます。また、会場の準備をしていただいた大会実行委員会の皆様に感謝いたします。

略語一覧

AGCM : Atmospheric General Circulation Model 大気大循環モデル
 AMIP : Atmospheric Model Intercomparison Project 大気大循環モデル相互比較プロジェクト
 AO : Arctic Oscillation 北極振動
 AR4 : The fourth Assessment Report (気候変動に関する政府間パネル) 第4次評価報告書
 CGCM : Atmosphere-ocean Coupled General Circulation Model 大気海洋結合モデル

tion Model 大気海洋結合モデル

CMIP3 : Coupled Model Intercomparison Project phase 3 第3次結合モデル相互比較プロジェクト

InterDec : The potential of seasonal-to-decadal-scale inter-regional linkages to advance climate predictions 季節~10年規模の地域間連関が気候予測の改善へ向けて持つ潜在的可能性

MIM : Mass-weighted Isentropic zonal Mean 質量重み付き等温面上帯状平均

MIROC4 : Model for Interdisciplinary Research on Climate version 4 東京大学, 国立環境研究所, 海洋研究開発機構を中心に開発された気候モデル

NAO : North Atlantic Oscillation 北大西洋振動

PAMIP : Polar Amplification Multi-model inter-comparison project 北極温暖化増幅に関するマルチモデル相互比較プロジェクト

S/N : Signal to Noise ratio 信号対雑音比

SST : Sea Surface Temperature 海面水温

WACE : Warm Arctic and Cold Eurasia バレンツ・カラ海の海水変動に強制される大気循環偏差パターン (Mori *et al.* 2014)

WACS : Warm Arctic Cold Siberia 北極が暖かいときにシベリアが寒冷となる大気循環偏差パターン (Inoue *et al.* 2012)

参 考 文 献

- Blindheim, J., V. Borovkov, B. Hansen, S. A. Malmberg, W. R. Turrell and S. Øster, 2000: Upper layer cooling and freshening in the Norwegian Sea in relation to atmospheric forcing. *Deep Sea Res.*, **47**, 655–680.
- Cagnazzo, C. and E. Manzini, 2009: Impact of the stratosphere on the winter tropospheric teleconnections between ENSO and the North Atlantic and European region. *J. Climate*, **22**, 1223–1238.
- Cohen, J. et al., 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geosci.*, **7**, 627–637.
- Deser, C., L. Sun, R. A. Tomas and J. Screen, 2016: Does ocean coupling matter for the northern extratropical response to projected Arctic sea ice loss? *Geophys. Res. Lett.*, **43**, doi:10.1002/2016GL067792.
- Gerber, F., F. Sedláček and R. Knutti, 2014: Influence of the western North Atlantic and the Barents Sea on European winter climate. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 561–567.
- Honda, M., J. Inoue and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707, doi: 10.1029/2008GL037079.

- Horton, D. E., N. C. Johnson, D. Singh, D. L. Swain, B. Rajaratnam and N. S. Diffenbaugh, 2015: Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature*, **522**, 465-469.
- Hwang, Y.-T., D. M. W. Frierson and J. E. Kay, 2011: Coupling between Arctic feedbacks and changes in poleward energy transport. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L17704, doi:10.1029/2011GL048546.
- Inoue, J., M. E. Hori and K. Takaya, 2012: The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly. *J. Climate*, **25**, 2561-2568.
- Jaiser, R., T. Nakamura, D. Handorf, K. Dethloff, J. Ukita and K. Yamazaki, 2016: Atmospheric winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations. *J. Geophys. Res.*, **121**, 7564-7577.
- Johnson, N. C., S.-P. Xie, Y. Kosaka and X. Li, 2018: Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown. *Nature Commun.*, **9**, 1724, doi:10.1038/s41467-018-04040-y.
- McCusker, K. E., J. C. Fyfe and M. Sigmond, 2016: Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss. *Nature Geosci.*, **9**, 838-842.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geosci.*, **7**, 869-873.
- Mori, M., Y. Kosaka, M. Watanabe, H. Nakamura and M. Kimoto, 2019: A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nature Clim. Change*, doi:10.1038/s41558-018-0379-3.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa and J. Ukita, 2015: A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn. *J. Geophys. Res.*, **120**, 3209-3227.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa and J. Ukita, 2016: The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 3494-3501.
- Ogawa, F. et al., 2018: Evaluating impacts of recent Arctic sea ice loss on the Northern Hemisphere winter climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 3255-3263.
- Screen, J. A., 2017: Far-flung effects of Arctic warming. *Nature Geosci.*, **10**, 253-254.
- Screen, J. A. et al., 2018: Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models. *Nature Geosci.*, **11**, 155-163.
- Shepherd, T. G., 2016: Effects of a warming Arctic. *Science*, **353**, 989-990.
- Sun, L., J. Perlwitz and M. Hoerling, 2016: What caused the recent "Warm Arctic, Cold Continents" trend pattern in winter temperatures? *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 5345-5352.
- Wegmann, M. et al., 2015: Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 054015, doi:10.1088/1748-9326/10/5/054015.
- Wu, Y. and K. L. Smith, 2016: Response of Northern Hemisphere midlatitude circulation to Arctic amplification in a simple atmospheric general circulation model. *J. Climate*, **29**, 2041-2058.